

ДО ПИТАННЯ ВИБОРУ ШЕСТИФАЗНИХ ОБМОТОК ДЛЯ АСИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ**О. Б. Михайлюк**

Вінницький національний технічний університет

Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Вінницька область, 21000, Україна. E-mail: olegmm12@gmail.com

Виконано розрахункові дослідження та визначені переваги використання шестифазних обмоток в порівнянні зі звичайними трифазними, що дозволяє оптимізувати роботу машини в режимі генератора. Показано, що шестифазні обмотки мають більший обмотковий коефіцієнт за основною гармонікою. П'ята та сьома гармоніки в кривій магніторушійної сили, що чинять найбільший вплив на режим роботи машини, повністю відсутні. Також відсутні гармоніки 17 та 19. Виконано розрахунок обмоткових коефіцієнтів для трифазної та шестифазної обмоток. Показано, що обмотковий коефіцієнт для шестифазної обмотки збільшується на 3 %. Розраховано та порівняно масу матеріалу обмоток при переході з трифазної на шестифазну. Дослідження показали, що маса матеріалу шестифазної обмотки в середньому не перевищує 4 % в діапазоні потужностей машин від 40 до 90 кВт.

Ключові слова: асинхронний генератор, шестифазна обмотка, вищі гармоніки, обмотковий коефіцієнт.

К ВОПРОСУ ВЫБОРА ШЕСТИФАЗНЫХ ОБМОТОК ДЛЯ АСИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ**О. Б. Михайлюк**

Вінницький національний технічний університет

Хмельницькое шоссе, 95, г. Винница, Винницкая область, 21000, Украина. E-mail: olegmm12@gmail.com

Выполнены расчетные исследования и определены основные преимущества использования шестифазных обмоток по сравнению с обычными трехфазными, что позволяет оптимизировать работу машины в режиме генератора. Показано, что шестифазные обмотки обладают большим обмоточным коэффициентом по основной гармонике. Пятая и седьмая гармоника в графике магнитодвижущей силы, которые оказывают наибольшее влияние на режим работы машины, полностью отсутствуют. Также отсутствуют гармоники 17 и 19. Выполнен расчет обмоточных коэффициентов для трехфазной и шестифазной обмоток. Показано, что обмоточный коэффициент для шестифазной обмотки увеличивается на 3 %. Выполнен расчет и сравнение массы материала обмоток при переходе с трехфазной на шестифазную. Исследования показали, что масса материала шестифазной обмотки в среднем не превышает 4 % в диапазоне мощностей машин от 40 до 90 кВт.

Ключевые слова: асинхронный генератор, шестифазная обмотка, высшие гармоники, обмоточный коэффициент.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. В асинхронному генераторі (АГ), як і в будь-якій асинхронній машині (АМ), обмотка статора є найбільш складною, у виготовленні частиною машини. Обмотка статора визначає своїми електромагнітними властивостями, технологічністю і вартістю всі основні показники АГ. У зв'язку з цим вибір найбільш раціональних схем обмоток АГ і оптимізація їх електромагнітних параметрів - найважливіший етап розробки джерел живлення невеликої потужності на базі АГ. [1]

Дослідженню асинхронних генераторів присвячена велика кількість робіт вітчизняних і зарубіжних вчених. [2–11] У даних роботах розглядаються різні режими роботи генераторів та різні підходи до пояснення причин виникнення електромагнітних коливань, але найбільшу увагу в роботах по дослідженню асинхронних генераторів приділяється в першу чергу електромагнітним процесам в обмотках при самозбудженні та роботі з навантаженням.

Зокрема у роботах [8–10] наведено основні рівняння для визначення гармонічного складу магніторушійних сил (МРС) трифазних та шестифазних обмоток. Проте не надані результати розрахунків для аналітичного порівняння. В роботі [11] виконано аналіз спектру гармонік МРС шестифазної та трифазної обмоток, але не надано інформації про економічні аспекти впровадження шестифазних обмоток для існуючих трифазних машин. Отримані в [3–6] результати моделювання доводять, що шестифазна обмотка дозволяє підвищити ефективність

та надійність асинхронних машин в різних режимах роботи.

Метою даної роботи є порівняння гармонічного складу МРС трифазної та шестифазної обмоток, розрахунок та порівняння обмоткових коефіцієнтів для різного числа пазів на полюс і фазу. Розрахунок активного опору та маси обмоткового матеріалу при переході з трифазної на шестифазну обмотку.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. При використанні асинхронних машин в якості генераторів виникає необхідність оптимізації режимів роботи як самої машини, так і первинного двигуна. Вибір типу та конфігурації обмоток статора машини суттєво впливає на створення магнітного поля в зазорі між ротором і статором, за допомогою якого при обертанні ротора з коротко замкнутою обмоткою створюється електрорушійна сила в обмотці статора. Наявність гармонічних складових в формі МРС обмотки впливає на якість електричної енергії, що виробляється машиною, а також погіршує коефіцієнт корисної дії генератора.

Гармонічні складові являють собою струми з частотами, кратними основній частоті джерела живлення. Вищі гармоніки струму, що накладаються на основну гармоніку, призводять до спотворення форми струму. У свою чергу спотворення струму впливають на форму напруги в системі електроживлення, викликаючи додаткові втрати та погіршення режимів роботи навантаження [9].

Шестифазні обмотки трифазних асинхронних машин є поєднанням на загальному магнітопроводі двох трифазних обмоток. Одна обмотка зв'язана зіркою, інша обмотка зв'язана трикутником. При даній конфігурації обмотки просторово зміщені на $1/6$ полюсного ділення одна відносно одної. Відповідно струми за таких умов зсунуті на $1/12$ періоду. Відповідно фазні струми в обмотці, з'єднаній трикутником, повинні бути зсунуті по фазі в той же бік, в якій просторово зсунута обмотка трикутника. [10]

Зазвичай обмотка полюса електричної машини утворена декількома котушками, сторони яких поміщені в сусідніх пазах. Крива МРС такої зосередженої обмотки близька до прямокутної і крім першої гармоніки, в ній присутній цілий спектр гармонік вищих порядків. Розклад в ряд Фур'є для кривої МРС окремої обмотки [8]:

$$F_{kv} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin \omega t \frac{\sin \pi v (T_0/T)}{\pi v} \cos v \frac{2\pi}{T} x, \quad (1)$$

де T_0 – крок котушки; T – просторова координата, дорівнює подвійному полюсному діленню; v – порядок гармоніки; x – змінна просторова координата;

Шестифазна обмотка складається з двох трифазних обмоток, одна з яких з'єднана зіркою, а друга трикутником. В такому випадку аналіз МРС потрібно виконувати окремо для кожної трифазної частини. Для обмотки, що з'єднана зіркою, кути повороту кожної фази будуть відповідно дорівнювати $0, \frac{2\pi}{3}, \frac{4\pi}{3}$. Розклад в ряд Фур'є МРС трифазної обмотки, виводи якої з'єднані зіркою виконується наступним чином [10]:

$$F_{AY} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin \omega t \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v \frac{2\pi}{T} x; \quad (2)$$

$$F_{BY} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v \left(\frac{2\pi}{T} x - \frac{2\pi}{3} \right); \quad (3)$$

$$F_{CY} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v \left(\frac{2\pi}{T} x - \frac{4\pi}{3} \right); \quad (4)$$

Для визначення результуючої МРС кожної гармоніки потрібно скласти відповідні гармоніки обмоток всіх трьох фаз. Для першої, п'ятої та сьомої гармонік одержуємо вирази:

$$F_{Y1} = \frac{3}{\pi} I_m w \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{T} x \right); \quad (5)$$

$$F_{Y5} = \frac{3}{5\pi} I_m w \sin \left(\omega t + \frac{10\pi}{T} x \right); \quad (6)$$

$$F_{Y7} = -\frac{3}{7\pi} I_m w \sin \left(\omega t - \frac{14\pi}{T} x \right); \quad (7)$$

На відміну від обмотки, з'єднаної зіркою (2–7), обмотка, з'єднана трикутником зсунута в просторі на кут 30° . Тому, для обмотки, що з'єднана трикутником, кути повороту кожної фази будуть відповідно дорівнювати $\frac{\pi}{6}, \frac{5\pi}{6}, \frac{9\pi}{6}$. Відповідно рівняння результуючих МРС запишуться в іншому вигляді [10]:

$$F_{A\Delta} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{6} \right) \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v \left(\frac{2\pi}{T} x - \frac{\pi}{6} \right); \quad (8)$$

$$F_{B\Delta} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin \left(\omega t - \frac{5\pi}{6} \right) \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v \left(\frac{2\pi}{T} x - \frac{5\pi}{6} \right); \quad (9)$$

$$F_{C\Delta} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin \left(\omega t - \frac{9\pi}{6} \right) \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v \left(\frac{2\pi}{T} x - \frac{9\pi}{6} \right); \quad (10)$$

$$F_{\Delta 1} = \frac{3}{\pi} I_m w \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{T} x \right); \quad (11)$$

$$F_{\Delta 5} = \frac{3}{5\pi} I_m w \sin \left(\omega t + \frac{10\pi}{T} x - \pi \right); \quad (12)$$

$$F_{\Delta 7} = -\frac{3}{7\pi} I_m w \sin \left(\omega t - \frac{14\pi}{T} x + \pi \right); \quad (13)$$

Для визначення загальної МРС кожної гармоніки для всієї обмотки потрібно скласти відповідні гармоніки двох трифазних обмоток. Для першої, п'ятої та сьомої гармонік одержуємо вирази:

$$\sum F_1 = \frac{6}{\pi} I_m w \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{T} x \right); \quad (14)$$

$$\sum F_5 = \frac{6}{5\pi} I_m w \left(\begin{matrix} \sin \left(\omega t + \frac{10\pi}{T} x \right) + \\ \sin \left(\omega t + \frac{10\pi}{T} x - \pi \right) \end{matrix} \right) = 0; \quad (15)$$

$$\sum F_7 = -\frac{6}{7\pi} I_m w \left(\begin{array}{l} \sin(\omega t - \frac{14\pi}{T}x) + \\ \sin(\omega t - \frac{14\pi}{T}x + \pi) \end{array} \right) = 0; \quad (16)$$

Як бачимо, в кривій МРС, створеній шестифазною обмоткою, відсутні п'ята і сьома гармоніки, що є перевагою цієї обмотки перед звичайною трифазною обмоткою. Відповідно в спектрі МРС трифазної обмотки присутні гармоніки 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25. При використанні шестифазної обмотки в спектрі залишаються гармоніки 11, 13, 23, 25 [11].

Сумарна ЕРС розподіленої обмотки буде меншою, ніж зосередженої. Осі розподілених в сусідніх пазах котушок просторово зсунуті одна відносно одної на кут, що дорівнює зубцевому діленню. Вектори ЕРС зсунуті між собою на цей же кут, тому сумарна ЕРС обмотки буде дорівнювати не алгебраїчній, а геометричній сумі ЕРС всіх котушок, що входять в обмотку [13].

Враховуючи просторове розташування частин обмотки, з'єднаних в трикутник та зірку, обмотковий коефіцієнт зміниться в порівнянні зі звичайною трифазною обмоткою. Обмотковий коефіцієнт визначається як добуток коефіцієнта розподілу та коефіцієнта вкорочення [12, 13]:

$$k_{o\sigma} = k_p k_e; \quad (17)$$

Коефіцієнт розподілу для кожної з гармонік визначається:

$$k_p = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2m}v\right)}{q \sin\left(\frac{\pi}{2mq}v\right)}, \quad (18)$$

де v - номер гармоніки, m - число фаз, q - кількість пазів на полюс і фазу.

Коефіцієнт вкорочення обмотки:

$$k_e = \sin \frac{\pi}{2} \beta, \quad (19)$$

$$\beta = \frac{2}{3} \cdot \frac{q+1}{q}. \quad (20)$$

Аналіз виразів (17-20) показує, що при $q = 1$ для всіх гармонік коефіцієнт розподілу буде рівний одиниці. Зі збільшенням числа q коефіцієнт розподілу зменшується до певних меж, що відповідає абсолютному рівномірному розподілу провідників обмотки по дузі полюсного ділення. Зменшення коефіцієнта розподілу відбувається по-різному для різних гармонік [13]. Як видно з табл. 1, для першої гармоніки він зменшується від значення 0,966 до 0,957, а для вищих гармонік зменшується значно швидше.

Розраховані обмоткові коефіцієнти для трифазної та шестифазної обмоток для різної кількості пазів на полюс і фазу наведено в табл. 1 та 2. Порівняно з трифазною, шестифазна обмотка має вищий обмотковий коефіцієнт по першій гармоніці. Для наявних вищих гармонік обмоткові коефіцієнти значно нижчі. В табл. 3 наведено розрахункові значення різниці між обмотковими коефіцієнтами для трифазної та шестифазної обмоток. Результати свідчать про те, що обмотковий коефіцієнт шестифазної обмотки в середньому на 3 % вищий.

Таблиця 1 – Обмоткові коефіцієнти для трифазної обмотки

Номер гармоніки	Число пазів на полюс і фазу				
	2	3	4	5	6
1	0,966	0,96	0,958	0,957	0,957
5	0,259	0,217	0,205	0,2	0,197
7	0,259	0,177	0,158	0,149	0,145
11	0,966	0,177	0,126	0,11	0,102
13	0,966	0,217	0,126	0,102	0,084
17	0,259	0,96	0,158	0,102	0,84
19	0,259	0,96	0,205	0,11	0,084
23	0,966	0,217	0,958	0,149	0,092
25	0,966	0,177	0,958	0,2	0,102

Таблиця 2 – Обмоткові коефіцієнти для шестифазної обмотки

Номер гармоніки	Число пазів на полюс і фазу				
	2	3	4	5	6
1	0,991	0,99	0,989	0,989	0,989
11	0,131	0,105	0,098	0,095	0,093
13	0,131	0,095	0,086	0,082	0,08
23	0,991	0,095	0,065	0,055	0,051
25	0,991	0,105	0,065	0,054	0,049

Таблиця 3 – Обмоткові коефіцієнти для трифазної та шестифазної обмоток

Число фаз	Число пазів на полюс і фазу				
	2	3	4	5	6
m=3	0,966	0,96	0,958	0,957	0,957
m=6	0,991	0,99	0,989	0,989	0,989
Δ, %	2,588	3,125	3,236	3,344	3,344

В порівнянні з трифазними обмотками, шестифазна обмотка складається з двох частин, кожна з яких має різну кількість витків. Частина, що з'єднана в трикутних, знаходиться під тією ж напругою, що й частина, з'єднана в зірку. В даному випадку число витків для трикутника необхідно помножити на коефіцієнт 1,73, а переріз проводу відповідно поділити на 1,73. При цьому зміниться загальний активний опір обмотки, а також загальна маса матеріалу обмоток машини. Активний опір фази обмотки визначається за формулою [13]:

$$r = \rho \frac{L}{qa}, \quad (21)$$

де L – загальна довжина ефективного провідника фази, q – переріз ефективного провідника, ρ – питомий опір матеріалу обмотки, a – число паралельних гілок обмотки.

Відповідно для частини обмотки, що з'єднана трикутником:

$$q_{\Delta} = \frac{q_Y}{\sqrt{3}}; \quad (22)$$

Загальна довжина провідників фази визначається за формулою:

$$L = l_{cp} w, \quad (23)$$

де w – число витків фази, l_{cp} – середня довжина витка обмотки.

Для частини обмотки, що з'єднана трикутником:

$$w_{\Delta} = \sqrt{3} w_Y; \quad (24)$$

Середня довжина витка визначається як сума прямолінійних пазових та лобових частин обмотки:

$$l_{cp} = 2(l_l + l_n), \quad (25)$$

де l_n – довжина пазової частини обмотки, що дорівнює конструктивній довжині магнітопроводу машини, l_l – довжина лобової частини обмотки.

Для всіпних обмоток довжина лобової частини визначається за формулою:

$$l_l = K_l b_{кт} + 2B, \quad (26)$$

де K_l – коефіцієнт, що залежить від числа полюсів та ізоляції лобових частин, B – довжина прямоліній-

ної частини обмотки від паза магнітопроводу до початку лобових частин.

$$K_l = \frac{1}{\sqrt{1-m^2}}, \quad (27)$$

$$m = \frac{b+S}{t}, \quad (28)$$

де b – ширина міді котушки в лобовій частині, S – допустима відстань між провідниками сусідніх котушок, t – зубцеве ділення статора.

$$t = \frac{\pi D}{Z}, \quad (29)$$

де D – внутрішній діаметр статора, Z – кількість пазів статора.

Для переведення асинхронних генераторів з трифазної обмотки на шестифазну необхідно врахувати нове значення активного опору обмотки, а також масу матеріалу нової обмотки. На рис. 1-4 наведено графіки зміни активного опору трифазної та нової шестифазної обмоток. Розрахунок виконано для машин типу АИР потужністю від 0,5 до 90 кВт з частотою обертання ротора від 750 до 3000 об/хв [14]. Виходячи з отриманих результатів, при переході від трифазної до шестифазної обмотки, середнє значення активного опору не перевищує 2 %.

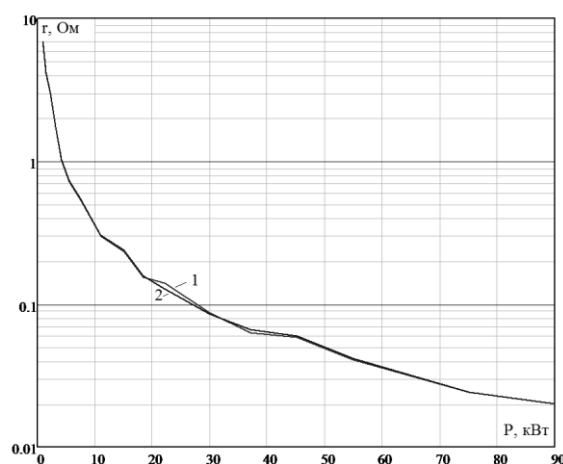


Рисунок 1 – Активний опір обмотки для машин з частотою обертання ротора 3000 об/хв: 1 – шестифазна обмотка; 2 – трифазна обмотка

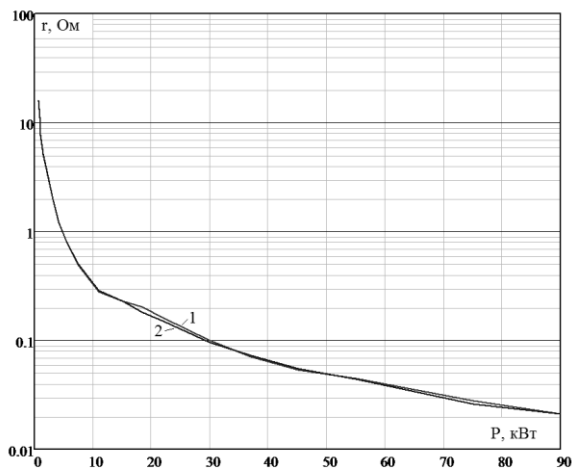


Рисунок 2 – Активний опір обмотки для машин з частотою обертання ротора 1500 об/хв: 1 – шестифазна обмотка; 2 – трифазна обмотка

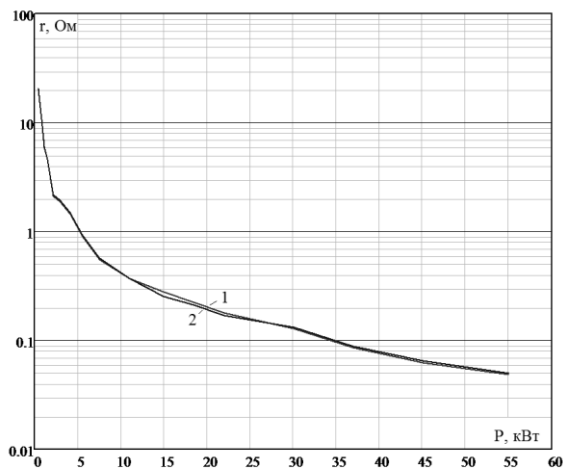


Рисунок 3 – Активний опір обмотки для машин з частотою обертання ротора 1000 об/хв: 1 – шестифазна обмотка; 2 – трифазна обмотка

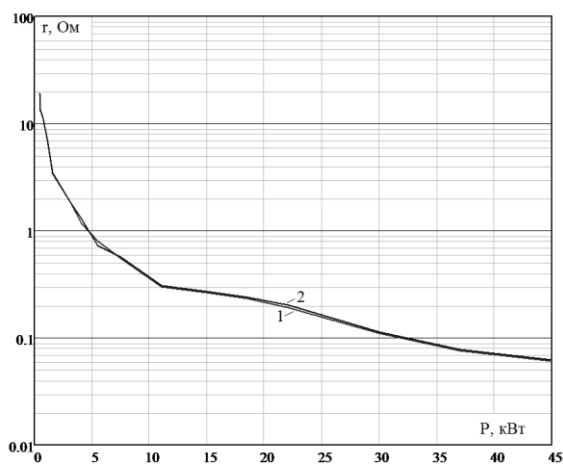


Рисунок 4 – Активний опір обмотки для машин з частотою обертання ротора 750 об/хв: 1 – шестифазна обмотка; 2 – трифазна обмотка

Маса матеріалу трифазної та нової шестифазної обмоток для машин типу АІР потужністю від 0,5 до 90 кВт [14] з частотою обертання ротора від 750 до 3000 об/хв наведено на рис. 5–8. Матеріал обмоток – мідний обмотковий провід при температурі 20°. Виходячи з отриманих результатів, при переході від трифазної до шестифазної обмотки, маса обмоткового матеріалу суттєво не відрізняється в діапазоні потужностей машин від 0,5 до 40 кВт, а в діапазоні від 40 до 90 кВт маса шестифазної обмотки збільшується на 1-4% порівняно з трифазною.

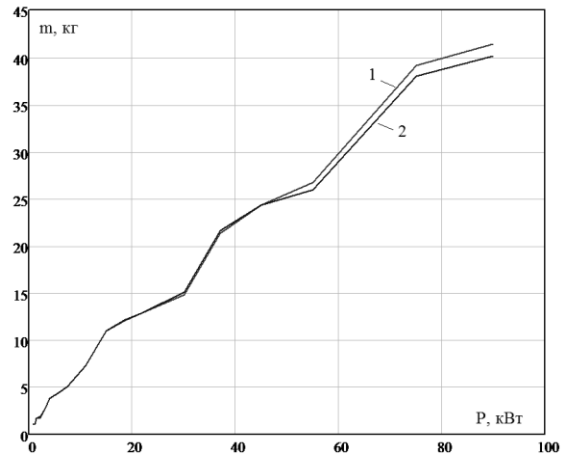


Рисунок 5 – Маса матеріалу обмоток для машин з частотою обертання ротора 3000 об/хв: 1 – шестифазна обмотка; 2 – трифазна обмотка

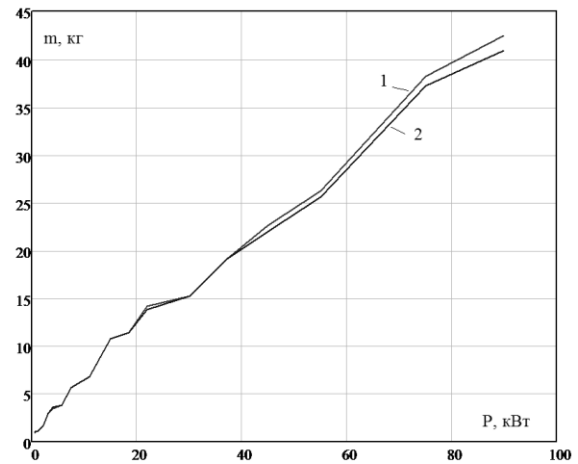


Рисунок 6 – Маса матеріалу обмоток для машин з частотою обертання ротора 1500 об/хв: 1 – шестифазна обмотка; 2 – трифазна обмотка

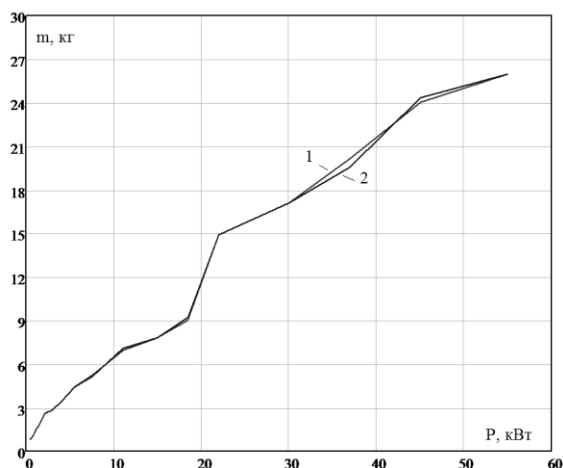


Рисунок 7 – Маса матеріалу обмоток для машин з частотою обертання ротора 1000 об/хв:
1 – шестифазна обмотка; 2 – трифазна обмотка

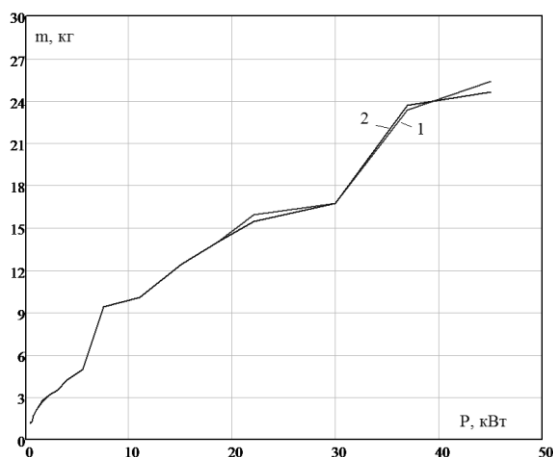


Рисунок 8 – Маса матеріалу обмоток для машин з частотою обертання ротора 750 об/хв:
1 – шестифазна обмотка; 2 – трифазна обмотка

ВИСНОВКИ. Шестифазна обмотка має суттєві переваги для використання в асинхронних машинах як в режимі двигуна, так і в режимі генератора. Порівнюючи отримані дані, обмоткові коефіцієнти для шестифазної обмотки вищі, ніж для трифазної. В спектрі МРС шестифазної обмотки відсутні 5-а та 7-а гармоніки, а обмотковий коефіцієнт збільшується на 3%.

При заміні трифазної обмотки на шестифазну середнє значення активного опору не перевищує 2%. Маса обмоткового проводу суттєво не відрізняється в діапазоні потужностей машин від 0,5 до 40 кВт, а в діапазоні від 40 до 90 кВт маса шестифазної обмотки збільшується на 1-4% порівняно з трифазною.

ЛІТЕРАТУРА

1. Богатырев Н. И., Баракин Н. С. Методика и результаты испытания асинхронного генератора с шестью фазными зонами. *Научный журнал КубГАУ*. № 117, 2016. С. 1–23.
2. Богдан А. В., Ильченко Я. А., Соболев А. Н. Применение асинхронного генератора для питания асинхронных двигателей. *Научный журнал КубГАУ*. № 97, 2014, С. 1–11.
3. Akrama E. J., Anih L. U. Modeling and simulation of multiphase induction machine, *International Journal of Engineering Innovation & Research*, 4(5): 732-736, 2015.
4. Mandal S. Performance analysis of six-phase induction motor, *International Journal of Engineering Research & Technology*, 4(2): 589-593, 2015.
5. Che H. S., Levi E., Jones M., Dura'n M. J., Hew W. P., Rahim N. A. Operation of a six-phase induction machine using series-connected machine-side converters, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(1): 164-176, 2014.
6. Barrero F., Arahal M. R., Gregor R., Toral S., Dura'n M. J. One-step modulation predictive current control method for the asymmetrical dual three-phase induction machine, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(6): 1974-1983, 2009.
7. Шокарев Д. А., Зачепа Ю. В. К вопросу построения системы регулирования емкостного тока возбуждения асинхронного генератора. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. № 4, 2006. С. 82–84.
8. Лущик В. Д., Полезін С. Ю. Переваги шестифазних обмоток для трифазних асинхронних двигунів. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. № 3, 2013. С. 20–24.
9. Жежеленко И. В., Саенко Ю. Л., Коровин С. Л. Компенсация высших гармоник асинхронными машинами с фазным ротором. *Вісник приазовського державного технічного університету*. № 16, 2006. С. 180–183.
10. Лущик В. Д. Шестифазні обмотки трифазних асинхронних двигунів. *Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета*. № 39, 2013. С. 204–211.
11. Kasten H. Electrical Machines with Higher Efficiency through Combined Star-Delta Windings, *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 2011, PP. 1374–1379.
12. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины. В 2-х т., М.: Издательство МЭИ, 2006, Т. 1, 652 с.
13. Копылов И. П. Проектирование электрических машин. М.: Издательство Юрайт, 2012, 767 с.
14. Петриков Л. В., Асинхронные электродвигатели: Обмоточные данные. Ремонт. Модернизация. М.: Энергоатомиздат, 2000, 496 с.

TO THE CHOICE OF THE SIX-PHASE WINDINGS FOR INDUCTION GENERATORS

O. Mykhailiuk

Vinnytsia National Technical University

Khmelnitsky highway, 95, Vinnytsia, Vinnytsia region, 21000, Ukraine. E-mail: olegmm12@gmail.com

Purpose. The purpose of this work is to compare the higher harmonic composition of magnetomotive force for three-phase and six-phase windings, calculate and compare winding factors for different numbers of stator teeth per pole and phase calculate the active resistance and the weight of the winding material during the conversion from the three-phase winding to six-phase winding. **Methodology.** Theoretical research of the winding parameters has been carried out. To conduct the research mathematical equations were used to obtain results for six-phase and three-phase windings. The analysis was performed for induction machines up to 90 kW power ratios and 750, 1000, 1500 and 3000 rpm speed ratios. **Results.** The six-phase winding has significant advantages for use in induction machines both in motor mode and in generator mode. Comparing the obtained data, winding factors for a six-phase winding are higher than for the three-phase one. In the magnetomotive force spectrum of six-phase winding there are no 5th and 7th harmonics, and the winding factor is increased by 3%. During the conversion a three-phase winding with the six-phase winding, the average value of the active resistance does not exceed 2%. The weight of the winding wire is not significantly different in the range of machine power ratios from 0.5 to 40 kW, and in the range from 40 to 90 kW the weight of the six-phase winding increases by 1-4% compared to the three-phase winding. **Originality.** For the first time the active resistance and winding material weight have been calculated taking into account the active power rated values in order to determine the difference between the common three-phase winding and newly designed six-phase winding. **Practical value.** The proposed computations allowed to get the highest possible winding factor values for induction machines. The winding factor improvement of the six-phase winding allows to use this kind of winding instead of traditional three-phase winding. The obtained result makes it possible to predict the value of winding material consumption for six-phase and three-phase windings in case of machine modernization in order to increase energy efficiency.

Key words: asynchronous generator, six-phase winding, higher harmonics, winding factor.

REFERENCES

1. Bogatyryov, N. I., Barakin, N. S. (2016), "The methods and the results of the testing of an asynchronous generator with six phase zones", *Scientific journal of KubSAU*, no. 117, pp. 1-23.
2. Bogdan, A. V., Ilchenko, Y. A., Sobol, A. N. (2014), "Application of asynchronous generator for induction motor's feeding", *Scientific journal of KubSAU*, no. 97, pp. 1-11.
3. Akpama, E. J., Anih, L. U. (2015), "Modeling and simulation of multiphase induction machine", *International Journal of Engineering Innovation & Research*, no. 4(5), pp. 732-736.
4. Mandal, S. (2015), "Performance analysis of six-phase induction motor", *International Journal of Engineering Research & Technology*, no. 4(2), pp. 589-593.
5. Che, H. S., Levi, E., Jones, M., Dura'n, M. J., Hew, W. P., Rahim, N. A. (2014), "Operation of a six-phase induction machine using series-connected machine-side converters", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, no. 61(1), pp. 164-176.
6. Barrero, F., Arahal, M. R., Gregor, R., Toral, S., Dura'n, M. J. (2009), "One-step modulation predictive current control method for the asymmetrical dual three-phase induction machine", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, no. 56(6), pp. 1974-1983.
7. Shokarev, D. A., Zachepa, Y. V. (2006), "To the question of building a regulatory system for capacitive current excitation asynchronous generator", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, no. 4, pp. 82-84.
8. Lushchyk, V., Polezin, S. (2013), "Advantages of hexaphase windings for three-phase induction motors", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, no. 3, pp. 20-24.
9. Zhezhenko, I. V., Saenko, Y. L., Korovin, S. L. (2006), "Compensation of higher harmonics by asynchronous machines with a phase rotor", *Bulletin of Azov State Technical University*, no. 16, pp. 180-183.
10. Lushchyk, V. (2013), "Six-phase windings of three-phase asynchronous motors", *Scientific Works of Donbass State Technical University*, no. 39, pp. 204-211.
11. Kasten, H. (2011), "Electrical machines with higher efficiency through combined star-delta windings", *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, pp. 1374-1379.
12. Ivanov-Smolenskiy, A. V. (2006), *Elektricheskiye mashiny* [Electrical machines], MEI Publishing, Moscow, Russia.
13. Kopylov, I. P. (2012), *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Design of Electrical Machines], Yurayt, Moscow, Russia.
14. Petrikov, L. V. (2000), *Asinkhronnye elektrodvigateli: Obmotochnye dannye. Remont. Modernizatsiya* [Asynchronous electric motors: Winding data. Repairs. Modernization], Energoatomizdat, Moscow, Russia.

Стаття надійшла 28.09.2018.